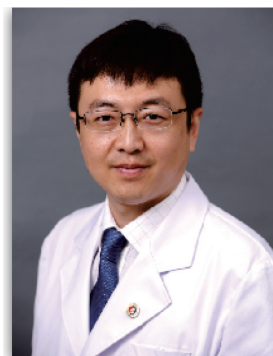


· 中青年学者论坛 ·



**李东** 医学博士, 英国牛津大学博士后。天津医科大学总医院放射科主任医师、硕士生导师。擅长心胸疾病影像学诊断。现任中华医学会放射学分会青年委员会秘书长、放射学分会大数据与医学人工智能工作委员会委员、心血管病学会影像学组委员, 中国医师协会放射医师分会心血管专业委员会委员, 国家心血管病专业质控中心专家委员会心血管影像专家工作组委员, 国际心血管 CT 协会 (SCCT) 中国区论坛委员兼青年委员会副主席, 国际心血管磁共振协会 (SCMR) 中国区论坛委员, 中国医疗保健国际交流促进会胸痛分会影像学组副组长, 天津市心脏学会常务理事兼心脏影像专业委员会主任委员, 天津市放射学会青年委员会委员等。多本期刊编委及审稿专家。近5年作为第一作者和(或)通信作者在国内外杂志发表论文40余篇。参编国家统编教材2部。主持参与国家自然科学基金、天津市自然科学基金等省部级以上科研项目7项。

DOI: 10.16781/j.0258-879x.2019.03.0233

## 心脏磁共振成像在急性 ST 段抬高型心肌梗死中的应用新进展

李东\*, 任雯

天津医科大学总医院放射科, 天津 300052

**[摘要]** 再灌注治疗明显降低了急性 ST 段抬高型心肌梗死 (STEMI) 患者的死亡率, 但是 STEMI 导致的心力衰竭死亡率仍呈增高趋势, 因此探寻改善 STEMI 患者预后的新的治疗方法仍是重要任务。心脏磁共振 (CMR) 检查是评估 STEMI 新治疗方法疗效和患者预后的重要工具。纵向弛豫时间定量成像 (T1 mapping) 和横向弛豫时间定量成像 (T2 mapping) 等新技术有助于从更深层次探究 STEMI 再灌注后心肌水肿、微血管梗阻、心肌内出血、对侧心肌间质间隙等病理生理学改变。本文就近几年 CMR 在 STEMI 再灌注后的应用新进展进行探讨。

**[关键词]** 心肌梗死; 急性 ST 段抬高; 经皮冠状动脉介入术; 磁共振成像; 微血管梗阻; 心肌内出血

**[中图分类号]** R 542.22 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0258-879X(2019)03-0233-05

### Application of cardiac magnetic resonance imaging in acute ST-segment elevation myocardial infarction: recent advances

LI Dong\*, REN Wen

Department of Radiology, Tianjin Medical University General Hospital, Tianjin 300052, China

**[Abstract]** Reperfusion therapy has significantly reduced the mortality of patients with acute ST-segment elevation myocardial infarction (STEMI), but the associated heart failure mortality is on a rise. It is important to seek novel cardioprotective therapies to improve clinical outcomes. Cardiac magnetic resonance (CMR) is an important imaging modality for assessing the efficacy of the novel therapies and the prognosis of the patients. T1 mapping and T2 mapping have provided new insights into the pathophysiology underlying myocardial edema, microvascular obstruction, intramyocardial hemorrhage, and the remote myocardial interstitial space after reperfused STEMI. This review sums up the recent advances on the application of the CMR in reperfused STEMI.

**[Key words]** myocardial infarction; acute ST-segment elevation; percutaneous coronary intervention; magnetic resonance imaging; microvascular obstruction; intramyocardial hemorrhage

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2019, 40(3): 233-237]

**[收稿日期]** 2019-02-10 **[接受日期]** 2019-02-28

**[基金项目]** 国家自然科学基金青年科学基金(81301217), 科技部“十三五”国家重点研发计划(2016YFC1300402), 天津市应用基础与前沿技术研究计划(14JCZDJC57000, 18JCYBJC25100). Supported by Young Science Fund of National Natural Science Foundation of China (81301217), “13<sup>th</sup> Five-Year” National Key Research and Development Plan of Ministry of Science and Technology of China (2016YFC1300402), and Tianjin Applied Foundation and Frontier Technology Research Program (14JCZDJC57000, 18JCYBJC25100).

**[作者简介]** 李东, 博士, 主任医师, 硕士生导师。

\*通信作者(Corresponding author). Tel: 022-60364125, E-mail: dr\_lidong@163.com

再灌注治疗明显降低了急性 ST 段抬高型心肌梗死 (ST-segment elevation myocardial infarction, STEMI) 患者的死亡率<sup>[1]</sup>, 然而, 再灌注治疗可导致进一步的心肌损伤和心肌细胞死亡, 即再灌注损伤。此外, STEMI 后心力衰竭导致患者死亡率呈明显增高趋势<sup>[2]</sup>。因此, 找到有效减小心肌梗死灶和预防梗死后心力衰竭的治疗方法是当前研究的热点<sup>[3]</sup>。心脏磁共振 (cardiac magnetic resonance, CMR) 是评价 STEMI 治疗方法能否减小梗死灶、能否预防左心室负性重构的重要工具<sup>[4]</sup>。

近年来, 纵向弛豫时间定量成像 (T1 mapping) 和横向弛豫时间定量成像 (T2 mapping) 等 CMR 新技术发展迅速<sup>[5]</sup>, 这些新技术有助于从更深层面探究 STEMI 再灌注后病理生理学变化 [如 STEMI 后第 1 周心肌水肿、微血管梗阻 (microvascular obstruction, MO) 和心肌内出血 (intramyocardial hemorrhage, IMH)] 的演变及其对患者预后的价值<sup>[6-8]</sup>, 以及梗死后对侧心肌 (remote myocardium) 间质间隙的变化及其对左心室负性重构的影响等<sup>[9]</sup>。本文综述了 CMR 在 STEMI 再灌注后的应用新进展。

## 1 STEMI 再灌注后病理生理学变化及其 CMR 表现

**1.1 心肌梗死灶大小** 心肌梗死灶大小可通过 CMR 钆造影剂延迟增强 (late gadolinium enhancement, LGE) 序列定量评估, 通常用梗死灶占左心室心肌总体积或总质量的百分比表示。钆造影剂不能通过完整的细胞膜, 急性心肌坏死后细胞膜破裂后造影剂可进入这些细胞; 陈旧性心肌梗死细胞外间隙扩大导致胶原沉积, 残余的完整心肌细胞数量相对较少, 造影剂从血管内进入细胞外间隙。因此, 急性和陈旧性心肌梗死灶内的造影剂分布浓度均高于正常心肌而表现为延迟强化。

**1.2 MO 与 IMH** MO 是指虽然心外冠状动脉再通, 但是梗死区心肌微循环仍未能得到有效再灌注<sup>[10]</sup>。钆造影剂早期增强 (early gadolinium enhancement, EGE) 和 LGE 序列图像均可显示 MO, 表现为强化区内的低信号核心。如果发生 STEMI 后心肌微循环损伤非常严重, 血管完整性被严重破坏, 红细胞则会进入心肌内而出现 IMH<sup>[7]</sup>。心肌内的血红蛋白降解产物在 T2\* 加权像或 T2\* mapping 图像上表现为低信号核心<sup>[11]</sup>, 其原理与脑出血的磁共振成像原理相似。T2 加权成像和 T2 mapping 也可检出 IMH, 但其灵敏度低于 T2\* 加权成像和 T2\* mapping<sup>[12]</sup>。

**1.3 危险区 (area at risk, AAR)** AAR 是指梗死动脉支配的心肌区域, 包括可逆损伤心肌 (可挽救心肌) 和梗死心肌。如果 STEMI 后不能及时、有效地挽救存活心肌则会发生梗死。检测和定量 STEMI 后 AAR 的 CMR 技术很多, 包括 T2 加权成像<sup>[13]</sup>、T2 mapping<sup>[14]</sup>、T1 mapping<sup>[15]</sup>、EGE 序列<sup>[16]</sup>等, 但目前尚无系统比较这些技术的研究或共识。

AAR 和梗死心肌大小的差值即为可挽救心肌的大小。心肌挽救指数 (myocardial salvage index) 指可挽救心肌与 AAR 大小的比值, 是评估 STEMI 治疗效果较灵敏的方法, 且优于心肌梗死灶大小<sup>[17]</sup>。

## 2 CMR 在 STEMI 再灌注后的应用

CMR 技术提高了医师对心肌梗死、MO 和 IMH 等的认识, 已成为临床探讨心肌梗死灶大小、心肌残余铁离子、对侧心肌等在左心室负性重构中所起作用的有力工具。

**2.1 心肌梗死灶的定量评价** 近来, T1 mapping 成为定量心肌梗死灶的重要技术, 具有替代传统 LGE 序列的潜力。虽然增强 T1 mapping 能够准确定量急性心肌梗死灶的大小<sup>[18]</sup>, 但是平扫 T1 mapping 评价心肌梗死灶大小的价值更值得关注。Liu 等<sup>[19]</sup>研究表明平扫 T1 mapping 能够准确评价急性心肌梗死灶的大小; Alkhalil 等<sup>[20]</sup>也通过平扫 T1 mapping 监测 STEMI 患者早期梗死心肌的范围和 T1 值的演变过程。可见未来可能不需要造影剂即可综合评价 STEMI 患者的心肌梗死。另有研究发现, 平扫 T1 mapping 可有效缩短扫描时间, 从而使 CMR 能够应用于更广泛的人群<sup>[21]</sup>。近来, Garg 等<sup>[22]</sup>探讨了应用急性期细胞外容积 (extracellular volume, ECV) 分数能够评估 STEMI 患者最终的心肌梗死灶大小, 发现急性期 ECV 分数  $\geq 0.46$  能够预测陈旧性心肌梗死灶的大小。表明 ECV 能够作为 LGE 序列检查的补充, 被用来评估心肌梗死灶的大小。

尽管 T1 mapping 在定量评价 STEMI 患者心肌梗死灶的大小方面具有广阔的应用前景, 但是目前发表的数据均为单中心小样本研究。在被广泛认可之前, 还需要多中心的大样本研究进一步验证。

**2.2 MO 和 IMH 的关系** STEMI 患者在经皮冠状动脉介入 (percutaneous coronary intervention, PCI) 术后的一系列 CMR 成像证明, MO 和 IMH 的发生和范围会随时间发生变化。LGE 序列显示的 MO 范围在 PCI 术后 4~12 h 达到峰值, 并在 PCI 术后



48 h 内保持稳定<sup>[7]</sup>; Ørn 等<sup>[23]</sup>研究发现仅在 PCI 术后第 2 天 MO 与左心室负性事件有关。对于 IMH, 有研究显示其在 PCI 术后第 3 天达到峰值<sup>[6]</sup>。

研究表明, STEMI 再灌注患者 EGE 序列显示的 MO 发生率为 60%~65%; LGE 显示的 MO 发生率为 50%~55%, IMH 发生率为 35%~40%<sup>[7,24]</sup>。Hamirani 等<sup>[24]</sup>发现 LGE 显示 MO 的特异度和预测价值均高于 EGE, 且 IMH 与 LGE 显示的 MO 的相关性明显高于其与 EGE 显示的 MO 的相关性。Carrick 等<sup>[7]</sup>利用 T2\* mapping 技术对 286 例伴 IMH 的 STEMI 患者资料进行分析, 结果显示 286 例患者 LGE 都检出 MO。但两者的关系尚不清楚, 究竟是 MO 导致内皮细胞损伤而造成血液渗漏, IMH 仅是 MO 严重程度的标志, 还是 IMH 压迫血管导致或加重 MO? 相关机制仍需进一步探讨。

**2.3 心肌梗死灶大小与左心室负性重构** 通常情况下, 心肌梗死灶越大左心室壁应力越高。STEMI 患者左心室代偿性扩张保证了其每搏输出量, 然而, 左心室扩张会导致心室壁应力更大, 在左心室壁没有代偿性增厚的情况下左心室扩张会更明显。Westman 等<sup>[25]</sup>探讨了 122 例 STEMI 患者心肌梗死灶大小 (占左心室心肌总体积的百分比) 与左心室负性重构的关系, 发现 15% 的心肌梗死灶大小 < 18.5% 的患者和 40% 的心肌梗死灶大小 ≥ 18.5% 的患者发生左心室负性重构。另一项研究分别探讨了急性心肌梗死灶大小和 MO 与左心室负性重构的关系, 发现心肌梗死灶和 MO 均较大的患者出现了左心室负性重构, 而心肌梗死灶较小且不伴 MO 的患者也可出现左心室负性重构<sup>[26]</sup>。由此可见, 左心室负性重构的发生并非仅与心肌梗死灶大小有关, 其过程可能非常复杂, 受诸多因素的影响。

**2.4 心肌残余铁离子与左心室负性重构** STEMI 患者 PCI 术后 IMH 导致恢复期心肌内出现残余铁离子, 这可能导致了梗死区炎症持续存在, 从而对左心室负性重构产生影响。Bulluck 等<sup>[8]</sup>发现 STEMI 患者存在 IMH、心肌残余铁离子及梗死周围组织内 T2 值持续升高, 进一步说明了心肌炎症的持续存在。Carberry 等<sup>[27]</sup>通过对 203 例 STEMI 患者资料的研究证实, T2\* mapping 检出 36% 的 STEMI 患者存在 IMH, 并在 PCI 术后 6 个月时发现 59% 的患者存在心肌残余铁离子, 且与 6 个月时左心室负性重构有关, 代表患者临床预后更差。

**2.5 梗死对侧心肌与临床预后** 对侧心肌通常指梗死区对侧 180° 的心肌节段。STEMI 患者 PCI 术

后对侧心肌的细胞外基质变化与左心室负性重构是否有关是目前研究的热点<sup>[9,28-30]</sup>。Bulluck 等<sup>[9]</sup>研究了 40 例 STEMI 患者的 ECV 图像, 发现急性期对侧心肌 ECV 分数升高, 并且 PCI 术后 5 个月内发生左心室负性重构的 STEMI 患者的 ECV 分数持续升高, 表明 STEMI 患者 PCI 术后对侧心肌存在细胞外基质的代偿性变化。急性期 ECV 分数升高是因为血管内间隙代偿性增大所致, 随访中 ECV 分数升高则可能表明弥漫性间质纤维化在一定程度上参与了左心室负性重构过程。Garg 等<sup>[30]</sup>发现对侧心肌节段 ECV 分数的升高还可能与受损心室壁增厚、左心室舒张末期容积变化等有关, 但 ECV 分数能否独立预测负性事件的发生有待进一步探讨。

应用 T1 mapping 的研究得到了类似的结果。Carrick 等<sup>[29]</sup>发现 STEMI 患者对侧心肌的平扫 T1 值较高, 其与左心室舒张末期容积变化有关, 且与主要心血管不良事件 (major adverse cardiovascular event, MACE) 独立相关。Reinstadler 等<sup>[28]</sup>对 STEMI 患者随访 6 个月也发现对侧心肌的平扫 T1 值升高与 MACE 独立相关。

由此可见, ECV 分数和 T1 mapping 序列 T1 值可能会成为临床判断 STEMI 患者预后及危险度分层的重要指标, 但需要多中心研究进一步证实。

**2.6 急性期心肌梗死灶大小、MO、IMH 与临床预后** 研究发现, STEMI 后的致死率和致残率与急性期心肌梗死灶大小密切相关。STEMI 患者心肌梗死灶每增大 5%, PCI 术后 1 年内因心力衰竭住院或死亡的相对风险比增加 20%。心肌梗死灶大小 ≤ 8% 的患者负性事件发生率为 1.2%, 心肌梗死灶大小 > 8% 且 ≤ 17.9% 的患者负性事件发生率增高至 2.5%, 心肌梗死灶大小 > 17.9% 且 ≤ 29.8% 的患者负性事件发生率为 5.6%, 心肌梗死灶大小 > 29.8% 的患者负性事件发生率为 8.8%<sup>[31]</sup>。该研究进一步证明了急性期心肌梗死灶大小的预后预测价值。

MO 和 IMH 均与较大的心肌梗死灶、左心室负性重构、较差的临床预后有关<sup>[24,32]</sup>。van Kranenburg 等<sup>[32]</sup>通过对 1 000 余例 STEMI 患者资料进行 meta 分析发现, 心肌梗死灶大小与 MACE 并非独立相关, 而 MO 是 MACE 的独立预测因素。近年来, Symons 等<sup>[33]</sup>研究证实, MO 对 STEMI 患者死亡率及因心力衰竭住院 STEMI 患者预后的预测价值高于心肌梗死灶大小。MO > 0.385 g 可作为预测未来发生 MACE 的一个因素<sup>[34]</sup>。IMH 与左心室负性重构及更差的临床预后有关<sup>[24]</sup>, 且其

与负性临床预后的相关性较 MO 更密切<sup>[7]</sup>, 可作为 STEMI 患者重要的预后和疗效评价指标。

由此可见, 有较大心肌梗死灶的 STEMI 患者预后较差, 且更可能出现 MO 和 IMH; 出现 MO 的 STEMI 患者比没有 MO 患者的预后差, 同时伴有 MO 和 IMH 的患者预后更差。

### 3 小结和展望

CMR 检查提高了临床对 STEMI 患者梗死心肌、可挽救心肌、对侧心肌的病理生理学变化的认识, 有助于进一步了解心肌梗死灶的大小及 MO、IMH 对患者预后的预测价值。CMR 技术的进步有效缩短了扫描时间, 甚至避免了造影剂的使用, 使适用人群进一步扩大。未来 CMR 在 STEMI 灌注后应用中的逐步规范化和标准化也将促进临床对 STEMI 病理生理学改变相关机制的认识, 有望成为 STEMI 患者危险度分层、指导治疗、评价疗效、改善预后的重要工具。

### [参考文献]

- [1] NABEL E G, BRAUNWALD E. A tale of coronary artery disease and myocardial infarction[J]. *N Engl J Med*, 2012, 366: 54-63.
- [2] TORABI A, RIGBY A S, CLELAND J G. Declining in-hospital mortality and increasing heart failure incidence in elderly patients with first myocardial infarction[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2009, 55: 79-81.
- [3] SAAD M, STIERMAIER T, FUERNAU G, PÖSS J, DE WAHA-THIELE S, DESCH S, et al. Impact of direct stenting on myocardial injury assessed by cardiac magnetic resonance imaging and prognosis in ST-elevation myocardial infarction[J]. *Int J Cardiol*, 2019, 283: 88-92.
- [4] NEUMANN F J, SOUSA-UVA M, AHLSSON A, ALFONSO F, BANNING A P, BENEDETTO U, et al. 2018 ESC/EACTS guidelines on myocardial revascularization[J]. *EuroIntervention*, 2019, 14: 1435-1534.
- [5] MESSROGHLI D R, MOON J C, FERREIRA V M, GROSSE-WORTMANN L, HE T, KELLMAN P, et al. Clinical recommendations for cardiovascular magnetic resonance mapping of T1, T2, T2\* and extracellular volume: a consensus statement by the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance (SCMR) endorsed by the European Association for Cardiovascular Imaging (EACVI)[J/OL]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2017, 19: 75. doi: 10.1186/s12968-017-0389-8.
- [6] CARRICK D, HAIG C, AHMED N, RAUHALAMMI S, CLERFOND G, CARBERRY J, et al. Temporal evolution of myocardial hemorrhage and edema in patients after acute ST-segment elevation myocardial infarction: pathophysiological insights and clinical implications[J/OL]. *J Am Heart Assoc*, 2016, 5: e002834. doi: 10.1161/JAHA.115.002834.
- [7] CARRICK D, HAIG C, AHMED N, MCENTEGART M, PETRIE M C, ETEIBA H, et al. Myocardial hemorrhage after acute reperfused ST-segment-elevation myocardial infarction: relation to microvascular obstruction and prognostic significance[J/OL]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2016, 9: e004148. doi: 10.1161/CIRCIMAGING.115.004148.
- [8] BULLUCK H, ROSMINI S, ABDEL-GADIR A, WHITE S K, BHUVA A N, TREIBEL T A, et al. Residual myocardial iron following intramyocardial hemorrhage during the convalescent phase of reperfused ST-segment-elevation myocardial infarction and adverse left ventricular remodeling[J/OL]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2016, 9: e004940. DOI: 10.1161/CIRCIMAGING.116.004940.
- [9] BULLUCK H, ROSMINI S, ABDEL-GADIR A, WHITE S K, BHUVA A N, TREIBEL T A, et al. Automated extracellular volume fraction mapping provides insights into the pathophysiology of left ventricular remodeling post-reperfused ST-elevation myocardial infarction[J/OL]. *J Am Heart Assoc*, 2016, 5: e003555. doi: 10.1161/JAHA.116.003555.
- [10] KRUG A, DU MESNIL DE ROCHEMONT, KORB G. Blood supply of the myocardium after temporary coronary occlusion[J]. *Circ Res*, 1966, 19: 57-62.
- [11] BULLUCK H, ROSMINI S, ABDEL-GADIR A, BHUVA A N, TREIBEL T A, FONTANA M, et al. Diagnostic performance of T1 and T2 mapping to detect intramyocardial hemorrhage in reperfused ST-segment elevation myocardial infarction (STEMI) patients[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2017, 46: 877-886.
- [12] KALI A, TANG R L, KUMAR A, MIN J K, DHARMAKUMAR R. Detection of acute reperfusion myocardial hemorrhage with cardiac MR imaging: T2 versus T2\*[J]. *Radiology*, 2013, 269: 387-395.
- [13] BERRY C, KELLMAN P, MANCINI C, CHEN M Y, BANDETTINI W P, LOWREY T, et al. Magnetic resonance imaging delineates the ischemic area at risk and myocardial salvage in patients with acute myocardial infarction[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2010, 3: 527-535.
- [14] VERHAERT D, THAVENDIRANATHAN P, GIRI S, MIHAI G, RAJAGOPALAN S, SIMONETTI O P, et al. Direct T2 quantification of myocardial edema in acute ischemic injury[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2011, 4: 269-278.
- [15] BULLUCK H, WHITE S K, ROSMINI S, BHUVA A, TREIBEL T A, FONTANA M, et al. T1 mapping and T2 mapping at 3T for quantifying the area-at-risk in reperfused STEMI patients[J/OL]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2015, 17: 73. doi: 10.1186/s12968-015-0173-6.
- [16] HAMMER-HANSEN S, LEUNG S W, HSU L Y, WILSON J R, TAYLOR J, GREVE A M, et al. Early gadolinium enhancement for determination of area at risk: a preclinical validation study[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2017, 10: 130-139.
- [17] ENGBLOM H, HEIBERG E, ERLINGE D, JENSEN S E, NORDREHAUG J E, DUBOIS-RANDÉ J L, et

- al. Sample size in clinical cardioprotection trials using myocardial salvage index, infarct size, or biochemical markers as endpoint[J/OL]. *J Am Heart Assoc*, 2016, 5: e002708. doi: 10.1161/JAHA.115.002708.
- [18] BULLUCK H, HAMMOND-HALEY M, FONTANA M, KNIGHT D S, SIRKER A, HERREY A S, et al. Quantification of both the area-at-risk and acute myocardial infarct size in ST-segment elevation myocardial infarction using T1-mapping[J/OL]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2017, 19: 57. doi: 10.1186/s12968-017-0370-6.
- [19] LIU D, BORLOTTI A, VILIANI D, JEROSCH-HEROLD M, ALKHALIL M, DE MARIA G L, et al. CMR native T1 mapping allows differentiation of reversible versus irreversible myocardial damage in ST-segment-elevation myocardial infarction: an OxAMI study (Oxford Acute Myocardial Infarction)[J/OL]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2017, 10: e005986. doi: 10.1161/CIRCIMAGING.116.005986.
- [20] ALKHALIL M, BORLOTTI A, DE MARIA G L, GAUGHRAN L, LANGRISH J, LUCKING A, et al. Dynamic changes in injured myocardium, very early after acute myocardial infarction, quantified using T1 mapping cardiovascular magnetic resonance[J/OL]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2018, 20: 82. doi: 10.1186/s12968-018-0506-3.
- [21] DASTIDAR A G, HARRIES I, PONTECORBOLI G, BRUNO V D, DE GARATE E, MORET C, et al. Native T1 mapping to detect extent of acute and chronic myocardial infarction: comparison with late gadolinium enhancement technique[J/OL]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2018. doi: 10.1007/s10554-018-1467-1.
- [22] GARG P, BROADBENT D A, SWOBODA P P, FOLEY J R J, FENT G J, MUSA T A, et al. Acute infarct extracellular volume mapping to quantify myocardial area at risk and chronic infarct size on cardiovascular magnetic resonance imaging[J/OL]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2017, 10: e006182. doi: 10.1161/CIRCIMAGING.117.006182.
- [23] ØRN S, MANHENKE C, GREVE O J, LARSEN A I, BONARJEE V V, EDVARSDEN T, et al. Microvascular obstruction is a major determinant of infarct healing and subsequent left ventricular remodelling following primary percutaneous coronary intervention[J]. *Eur Heart J*, 2009, 30: 1978-1985.
- [24] HAMIRANI Y S, WONG A, KRAMER C M, SALERNO M. Effect of microvascular obstruction and intramyocardial hemorrhage by CMR on LV remodeling and outcomes after myocardial infarction: a systematic review and meta-analysis[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2014, 7: 940-952.
- [25] WESTMAN P C, LIPINSKI M J, LUGER D, WAKSMAN R, BONOW R O, WU E, et al. Inflammation as a driver of adverse left ventricular remodeling after acute myocardial infarction[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2016, 67: 2050-2060.
- [26] BULLUCK H, GO Y Y, CRIMI G, LUDMAN A J, ROSMINI S, ABDEL-GADIR A, et al. Defining left ventricular remodeling following acute ST-segment elevation myocardial infarction using cardiovascular magnetic resonance[J/OL]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2017, 19: 26. doi: 10.1186/s12968-017-0343-9.
- [27] CARBERRY J, CARRICK D, HAIG C, AHMED N, MORDI I, MCENTEGART M, et al. Persistent iron within the infarct core after ST-segment elevation myocardial infarction: implications for left ventricular remodeling and health outcomes[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2018, 11: 1248-1256.
- [28] REINSTADLER S J, STIERMAIER T, LIEBETRAU J, FUERNAU G, EITEL C, DE WAHA S, et al. Prognostic significance of remote myocardium alterations assessed by quantitative noncontrast T1 mapping in ST-segment elevation myocardial infarction[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2018, 11: 411-419.
- [29] CARRICK D, HAIG C, RAUHALAMMI S, AHMED N, MORDI I, MCENTEGART M, et al. Pathophysiology of LV remodeling in survivors of STEMI: inflammation, remote myocardium, and prognosis[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2015, 8: 779-789.
- [30] GARG P, BROADBENT D A, SWOBODA P P, FOLEY J R J, FENT G J, MUSA T A, et al. Extracellular expansion in the normal, non-infarcted myocardium is associated with worsening of regional myocardial function after acute myocardial infarction[J/OL]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2017, 19: 73. doi: 10.1186/s12968-017-0384-0.
- [31] STONE G W, SELKER H P, THIELE H, PATEL M R, UDELSON J E, OHMAN E M, et al. Relationship between infarct size and outcomes following primary PCI: patient-level analysis from 10 randomized trials[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2016, 67: 1674-1683.
- [32] VAN KRANENBURG M, MAGRO M, THIELE H, DE WAHA S, EITEL I, COCHET A, et al. Prognostic value of microvascular obstruction and infarct size, as measured by CMR in STEMI patients[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2014, 7: 930-939.
- [33] SYMONS R, PONTONE G, SCHWITTER J, FRANCONI M, IGLESIAS J F, BARISON A, et al. Long-term incremental prognostic value of cardiovascular magnetic resonance after ST-segment elevation myocardial infarction: a study of the collaborative registry on CMR in STEMI[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2018, 11: 813-825.
- [34] GALEA N, DACQUINO G M, AMMENDOLA R M, COCO S, AGATI L, DE LUCA L, et al. Microvascular obstruction extent predicts major adverse cardiovascular events in patients with acute myocardial infarction and preserved ejection fraction[J/OL]. *Eur Radiol*, 2018. doi: 10.1007/s00330-018-5895-z.